

TITLE OF THE INVENTION

SCANNING UNIT AND SCANNING MICROSCOPE HAVING THE SAME

CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS

5 This application is based upon and claims the benefit of priority from the prior Japanese Patent Applications No. 2000-71128, filed March 14, 2000; and No. 2001-34391, filed February 9, 2001, the entire contents of which are incorporated herein by reference.

BACKGROUND OF THE INVENTION

10 本発明は、走査型顕微鏡や、走査型顕微鏡の技術を応用した試料の観察や加工や情報の記録などを行う装置に用いられる走査機構に関する。さらには、これを用いた走査型顕微鏡に関する。

15 対象物を並進移動させたり回転移動させたりするステージ機構は、機械機構の最も基本的な要素の一つである。またモータなどの駆動機構を用いたステージ移動を電気信号などの制御信号に応じて移動制御できる自動ステージはあらゆる場面で使われている。

20 比較的短い時間内に対象物を繰り返し往復並進移動あるいは正逆回転移動させる機械機構は走査機構とも呼ばれる。ここでは、特に断りの無い限りこのような機械機構を単に走査機構と呼ぶことにする。

例えば走査型顕微鏡などには、そのような走査機構が搭載されている。そのような走査機構が搭載された走査型顕微鏡装置として、走査型プローブ顕微鏡やレーザ走査型顕微鏡、さらには電子ビームを固定したまま試料を走査して画像を得るタイプの電子走査型顕微鏡が例としてあげられる。

25 走査型プローブ顕微鏡(SPM)は、機械的探針を機械的に走査して試料表面の情報を得る走査型顕微鏡であり、走査型トンネリング顕微鏡(STM)、原子間力顕微鏡(AFM)、走査型磁気力顕微鏡(MFM)、走査型電気容量顕微鏡(SCAM)、走査型近接場光顕微鏡(SNOM)、走査型熱顕微鏡(SThM)などを含んでいる。最近では試料表面にダイヤモンド製の探針を押しつけて圧痕をつけ、その圧痕の

つき具合を解析して試料の固さなどを調べるナノインデンタ等もこのSPMの一つと位置づけられており、前述の各種の顕微鏡と共に広く普及している。

走査型プローブ顕微鏡は、機械的探針と試料を相対的にラスタ走査あるいはXY走査しながら、所望の試料領域の表面情報を機械的探針を介して得ることで、モニターTV上にマッピング表示することができる。また、SNOMなどは機械的探針先端から発せられる光を被加工物に作用して微細加工を行ったり、光による情報記録を行ったりすることができる。さらには、ナノインデンタによれば試料表面に凹凸を形成し、やはり微細加工を行ったり、情報記録を行ったりすることができる。

このような走査型プローブ顕微鏡においては、XY走査の間、試料と探針のZ軸に沿った相対位置すなわち間隔を、試料と探針との相互作用が一定になるようフィードバック制御している。このZ軸に沿った動きは、X軸とY軸に沿った規則的な動きとは異なり、試料の表面形状や表面状態を反映するために不規則であるが、一般にZ走査と呼ばれている。このZ走査は、XYZ走査のなかで最も高い周波数を有している。走査型プローブ顕微鏡のX走査の周波数は0.05から200Hz程度であり、Y走査の周波数は、X走査の周波数のY走査ライン数分の1程度であって、Y走査ライン数は10から1000ラインである。またZ走査の周波数はX走査の周波数に対し、X走査1ラインあたりの画素数倍からその100倍程度である。

例えば、X軸に沿って100画素、Y軸に沿って100画素を有する画像を1秒で取り込むには、X走査の周波数は100Hz、Y走査の周波数は1Hz、Z走査の周波数は10kHz以上となる。なお、この例の走査周波数は走査型プローブ顕微鏡としては今のところ最も高い走査周波数にあたり、通常はX走査の周波数は数Hz程度に留まっている。この例のような高い走査周波数を実現するには、その走査機構は、外部からの振動に対し安定であるのはもちろん、内部の走査動作にともない自分自身で発生する振動が小さく抑えられている必要がある。

走査機構の駆動は、その反作用として、これを支持している支持部を振動させる。支持部の振動は、再び走査機構に作用して、その対象物を振動させる。このため、対象物の高精度の位置制御が要求される走査機構は、このような振動の発

生が極力抑えられている必要がある。振動の発生を抑える一つの有効な方法は、対象物をゆっくり移動させることであるが、これは、走査機構に要求される短い時間内に対象物を繰り返し移動させる機能に反する。

5

BRIEF SUMMARY OF THE INVENTION

本発明の主な目的は、振動の発生が抑えられた、これにより安定した高精度な位置制御を可能とする走査機構を提供することである。

本発明の別の目的は、このような走査機構を用いた走査型顕微鏡を提供することである。

10

Additional objects and advantages of the invention will be set forth in the description which follows, and in part will be obvious from the description, or may be learned by practice of the invention. The objects and advantages of the invention may be realized and obtained by means of the instrumentalities and combinations particularly pointed out hereinafter.

15

BRIEF DESCRIPTION OF THE SEVERAL VIEWS OF THE DRAWING

20

The accompanying drawings, which are incorporated in and constitute a part of the specification, illustrate presently preferred embodiments of the invention, and together with the general description given above and the detailed description of the preferred embodiments given below, serve to explain the principles of the invention.

図 1 は、本発明の第 1 の実施の形態の走査機構を備える走査型プローブ顕微鏡を示している。

25

図 2 A は図 1 に示される走査機構の斜視図であり、理解を容易にするために上下逆に描かれている。図 2 B はこの走査機構の Z 方向から見た側面図、図 2 C はこの走査機構の Y 方向から見た側面図、図 2 D はこの走査機構の X 方向から見た側面図である。

図 3 A は、図 2 A ～ 図 2 D に示される走査機構の動作を説明するための模式図である。図 3 B は、本発明の第 2 の実施の形態の走査機構の動作を説明するため

の模式図である。

図 4 A は本発明の第 3 の実施の形態の走査機構の斜視図であり、理解を容易にするために上下逆に描かれている。図 4 B はこの走査機構の X 方向から見た側面図である。

5 図 5 A は本発明の第 4 の実施の形態の走査機構の斜視図であり、理解を容易にするために上下逆に描かれている。図 5 B はこの走査機構の部分断面側面図である。

図 6 A は本発明の第 5 の実施の形態の走査機構の平面図であり、図 6 B はこの走査機構の Lx 線に沿った断面図である。

10 図 7 A は、本発明の走査機構の理解を助けるための、従来例に従う比較例 1 の走査機構の斜視図であり、図 7 B はこの走査機構の部分断面側面図である。

図 8 A は、本発明の走査機構の理解を助けるための、従来例に従う比較例 2 の走査機構の斜視図であり、図 8 B はこの走査機構の部分断面側面図である。

15 図 9 A は、本発明の走査機構の理解を助けるための、従来例に従う比較例 3 の走査機構の斜視図であり、図 9 B はこの走査機構の部分断面側面図である。

図 10 A は本発明の第 6 の実施の形態の走査機構の斜視図であり、図 10 B はこの走査機構を矢印 A 方向からみた図、図 10 C はこの走査機構を矢印 B からみた図である。

20 図 11 は、本発明の第 7 の実施の形態の走査機構の動作を説明するための図面である。

図 12 A は本発明の第 8 の実施の形態の走査機構の斜視図であり、図 12 B はこの走査機構を矢印 C 方向からみた図である。

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

25 第 1 の実施の形態

本発明の第 1 の実施の形態の走査機構を備える機械走査型顕微鏡すなわち走査型プローブ顕微鏡を図 1 に示す。

図 1 において、走査型プローブ顕微鏡 100 は、大まかに走査型プローブ顕微鏡機能の部分と光学顕微鏡機能の部分とを有している。

走査型プローブ顕微鏡機能の部分は、筐体 101、光センサーユニット 102、センサーユニット用 Z ステージ 103、スライドガラス 104、スライドガラス保持部 105、カンチレバーチップ 106、走査機構保持台 107、走査機構 200、アクチュエータ駆動回路 112、走査制御回路 113、フィードバック回路 114、AC/DC 変換回路 115、発振回路 116、プリアンプ回路 117、半導体レーザ駆動回路 118、コンピュータ 119、モニター TV 120 を有している。

また光学顕微鏡機能の部分は、光源ランプ 139 レンズ 138 を含む顕微鏡観察照明光学系 110、接眼レンズ 140 を含む顕微鏡観察観察光学系 111、ハーフプリズム 137、顕微鏡照明ランプ電源 121、更に走査型プローブ顕微鏡機能の部分と共用する光センサーユニット 102 の対物レンズ 122 を有している。

走査型プローブ顕微鏡機能の部分について説明を加える。走査機構保持台 107 は、手動で微小送りができる三本のマイクロメータヘッド 135 (図 1 には二本のみが描かれている) により、筐体 101 上に三点支持されている。また、走査機構 200 は、走査機構保持台 107 に支持されており、試料 109 は、図中下向きに、すなわちカンチレバーチップ 106 側と対向するように、走査機構 200 に取り付けられる。走査機構 200 は、試料 109 を X 軸、Y 軸、Z 軸に沿って微動走査させる。この走査機構 200 の詳細については後で詳しく説明する。走査機構 200 は、X 軸、Y 軸、Z 軸の各々に関してカンチレバーチップ 106 の探針 132 と試料 109 との位置の粗調整を行う調整機構を備えていてもよい。

光センサーユニット 102 は、カンチレバーチップ 106 のカンチレバー 131 の動きを測定する、光でこの方式の光センサーである。光センサーユニット 102 は、対物レンズ 122、対物レンズ支持台 123、プリズム 124、偏光ビームスプリッター 125、コリメートレンズ 126、半導体レーザ 127、レーザ位置調整ステージ 128、二分割フォトダイオード 129、フォトダイオード位置調整ステージ 130 を有している。

半導体レーザ 127 から発せられた光は、コリメートレンズ 126 で平行光とされた後、偏光ビームスプリッター 125 で反射された後、プリズム 124 で更

に反射され、対物レンズ 122 に入る。平行光は、対物レンズ 122 で集光され、カンチレバーチップ 106 のカンチレバー 131 の背面に集光される。カンチレバー 131 の背面で反射された光は、逆の道をたどり、偏光ビームスプリッター 125 を通過し、更に直進して二分割フォトダイオード 129 に至る。カンチレバー 131 の角度変位は、二分割フォトダイオード 129 上の光スポットの動きに反映され、電気信号として出力される。

光センサーユニット 102 の対物レンズ 122 は、顕微鏡観察照明光学系 110、顕微鏡観察観察光学系 111 とともに、光学顕微鏡観察光学系を構成し、試料 109 の光学顕微鏡観察を可能にする。対物レンズ 122 は、光学顕微鏡用の対物レンズであり、例えば 20 倍の倍率を有する。

センサーユニット用 Z ステージ 103 は、対物レンズ 122 を含む光センサーユニット 102 の位置を粗動調整するためにあり、光センサーユニット 102 に含まれる対物レンズ 122 を上下させ、光センサーの焦点合わせや顕微鏡観察の焦点合わせを行う。

スライドガラス保持部 105 は、スライドガラス 104 を保持する。スライドガラス保持部 105 には、カンチレバーチップ 106 の取り付け部から離れたところに、カンチレバー 131 を励振させるための励振用圧電素子 133 が固定されている。この励振用圧電素子 133 にはカンチレバー 131 の共振周波数近傍の交流電圧が印加される。励振用圧電素子 133 は、この電圧印加に応じて振動し、その振動はカンチレバーチップ 106 に伝わりカンチレバー 131 を振動させる。

このようにカンチレバー 131 を振動させる測定では、光センサーユニット 102 から出力されるカンチレバーの変位信号は交流的になる。AC/DC 変換回路 115 は、これを直流信号に変換する。カンチレバー 131 を振動させない測定では、この回路はバイパスされ動作されなくてもよい。

また、図 1 には、液体中での観察の様子が描かれており、走査機構 200 の試料 109 の付近からカンチレバーチップ 106 が固定されたスライドガラス 104 の近傍に、水 134 が垂らされており、試料 109 とカンチレバーチップ 106 は共に水中に位置している。大気中での測定を行う場合には、この水 134 は

不要である。

図 1 に示されるように、走査型プローブ顕微鏡 100 は、装置を制御/駆動する電気回路などを含んでいる。これらの回路動作は、従来より提案されている走査型プローブ顕微鏡の回路動作と同様である。

5 走査制御回路 113 には、コンピュータ 119 から、XYZ 走査の制御信号が与えられる。図 1 に「Z」で記される信号は、走査機構 200 の Z 走査用のアクチュエータとカンチレバーチップ 106 の探針 132 との距離を調整するための信号である。この「Z」の信号は主に測定前のフォースカーブ測定するときなど測定条件設定時にコンピュータから出力される。またコンピュータ 119 は発振回路 116 を制御して、励振用圧電素子 133 を動作させ、カンチレバー 131 をその共振周波数付近で振動させる。

10 測定に入ると、コンピュータ 119 から出力されるラスタ走査制御信号(図に「X」と「Y」で記される)に基づいて、走査機構 200 のアクチュエータが X 軸と Y 軸に沿って走査される。カンチレバー 131 の先端にある探針 132 と試料 109 の表面との相互作用に基づくカンチレバー 131 の変位は光センサーユニット 102 で検出され、光センサーユニット 102 はその変位信号を出力する。光センサーユニット 102 からの変位信号出力は、プリアンプ回路 117 で増幅され、AC/DC 変換回路 115 に入力される。AC/DC 変換回路 115 は、発振回路 116 からの参照信号の周波数成分の信号を抽出し、交流信号を直流信号に変換する。

20 フィードバック回路 114 は、コンピュータ 119 から指示されたセッティング信号と AC/DC 変換回路 115 からの入力信号とを比較し、走査制御回路 113 に Z フィードバック信号 Zfb を送る。この Z フィードバック信号 Zfb が Z 方向アクチュエータの走査制御信号となる。走査制御回路 113 は、Z フィードバック信号 Zfb に基づいてアクチュエータ駆動回路 112 を制御し、走査機構 200 の Z 走査用のアクチュエータを駆動する。コンピュータ 119 は、自分自身が発生する「X」と「Y」の走査制御信号とフィードバック回路 114 からの信号を元に、試料の表面情報を三次元情報として処理し、モニター TV 120 に表示させる。

本実施の形態の走査機構 200 について、図 2A～図 2D を参照しながら、詳しく説明する。図 2A～図 2D に示されるように、走査機構 200 は、走査機構保持台 201 と、これに固定されたアクチュエータ台座 202、203 と、アクチュエータ台座 202、203 に取り付けられたアクチュエータ 204、205、206 とを有している。

アクチュエータ 204 は、例えば X 軸に沿って伸縮可能であり、これはアクチュエータ保持部 207 を介してアクチュエータ台座 202 に実質的に支持されている。同様に、アクチュエータ 205 は、例えば Y 軸に沿って伸縮可能であり、これはアクチュエータ保持部 208 を介してアクチュエータ台座 203 に実質的に支持されている。アクチュエータ 206 は、Z 軸に沿って伸縮可能であり、これはアクチュエータ保持部 209 と 210 を介してアクチュエータ台座 202 と 203 に実質的に支持されている。

アクチュエータ 204、205、206 は、例えば、積層型圧電素子であり、圧電素子は、例えば、長さが 10 mm で断面が 5 mm × 3 mm であり、100 V の電圧印加に対して 3 μ m 伸び縮みする。アクチュエータ 204、205、206 は、それぞれ、そこから延びる二本の線を介しての駆動電圧の印加に応じて、X 軸、Y 軸、Z 軸に沿って伸縮する。

アクチュエータ保持部 207 は、アクチュエータ 204 の中央付近あるいは重心付近を保持している。アクチュエータ保持部 208 は、アクチュエータ 205 の中央付近あるいは重心付近を保持している。アクチュエータ保持部 209 と 210 は、アクチュエータ 206 の中央付近あるいは重心付近を保持している。

アクチュエータ 206 は、その端部に、移動対象物、例えば試料を保持するための試料保持部 211 が取り付けられている。試料保持部 211 は、この端面に試料台ガラスが取り付けられる。

X 軸に沿って伸縮可能なアクチュエータ 204 は、Z 軸に沿って伸縮可能なアクチュエータ 206 に面する端面に微小球 212 が取り付けられており、この微小球 212 は、アクチュエータ 206 の X 軸を横切る一方の端部側面に当て付けられている。同様に、Y 軸に沿って伸縮可能なアクチュエータ 205 は、アクチュエータ 206 に面する端面に微小球 213 が取り付けられており、この微小球

213は、アクチュエータ206のY軸を横切る一方の端部側面に当て付けられている。

このように、アクチュエータの端面が微小球を介して移動対象物に当て付けられている走査機構は、伸縮動作しないアクチュエータに設けられた微小球は移動対象物に対して案内として働き、伸縮動作する別のアクチュエータによる移動対象物の移動を妨げないため、動作特性の線形性が高いという利点を有している。

次に、図2A～図2Dに示される走査機構200のZ軸に沿った動作について、これを模式的に示している図3Aを参照して説明する。図3Aには、続く説明に必要な部材のみが示されている。

図3Aにおいて、アクチュエータ206は積層型圧電素子であり、その中央付近あるいは重心付近が、接着効果を持つシリコンゴム製のアクチュエータ保持部210によって、走査機構保持台201に設けられたアクチュエータ台座203に固定されている。積層型圧電素子206は、電圧の印加に応じて、アクチュエータ保持部210に固定された中央付近あるいは重心付近を基準にして、その両側の部分が、矢印で示されるように、互いに反対方向に伸縮する。

一般に、アクチュエータの動作は、これを保持するアクチュエータ保持部に振動やアクチュエータの動作の反作用による衝撃を与える。このような振動や衝撃は、走査機構を揺らす原因となる。高速での走査や高い周波数での走査では、走査機構の振動は極力抑えられることが望まれる。

本実施の形態では、アクチュエータ206の中央付近あるいは重心付近が保持されているので、図中に×印で示されるアクチュエータ206とアクチュエータ保持部210の界面においては、衝撃がバランスし、アクチュエータ台座203や走査機構保持台201に伝わる振動が抑えられる。これは、後述する図7Aと図7Bと図8Aと図8Bと図9Aと図9Bの比較例と比べることで、より良く理解されよう。

以上は、Z走査用のアクチュエータ206に関する振動発生抑制の説明であるが、X走査用のアクチュエータ204とY走査用のアクチュエータ205についても同様に振動の発生が抑制される。

従来の走査機構では、このような積層型圧電素子等のアクチュエータは、走査

範囲を広く取るため、つまり長いストロークを得るため、通常は一方の端部が保持されている。このため、アクチュエータの動作の反作用が保持部にかかり、これが走査機構を揺らせてしまっている。

これに対して、本実施の形態のようにアクチュエータの中央付近あるいは重心付近が保持された走査機構では、運動系の重心付近が保持されるため、保持位置でのぶれが抑えられる。その結果、この走査機構は、振動が少なく、高速走査に対しても安定に動作する。

図1で示した走査型プローブ顕微鏡では、X軸に関して100画素/ライン、Y軸に関して100ライン(10000画素/画面)でのデータの取り込みにおいて、 $0.5\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$ の試料表面の観察範囲を、0.5秒/画面という画像取り込み速度で、液体中の試料(150nm径のラテックス球)の測定が行えた。0.5秒/画面という画像取り込み速度の値は、走査型プローブ顕微鏡においては、極めて短時間である。なお、この測定には、液体中での共振周波数が395kHzの、長さ $9\mu\text{m} \times$ 幅 $2\mu\text{m} \times$ 厚さ $0.09\mu\text{m}$ の窒化シリコン製のカンチレバーが使用された。

また、本実施の形態の走査機構は、アクチュエータ206に、市販のアクチュエータを、加工することなく、そのまま使えるので、コストを安く抑えることができるという利点も有している。

第2の実施の形態

本発明の第2の実施の形態について図3Bを参照して説明する。図3Bは、図3Aに相当する図面であり、続く説明に必要な部材のみが示されている。また、これらの図面中、同じ参照符号で示される部材は同等の部材を示している。

本実施の形態の走査機構では、Z走査用のアクチュエータ305は、例えばアルミニウムのブロックからなるアクチュエータ連結部308と、これに連結された二本の積層型圧電素子306、307とを有している。二本の積層型圧電素子306、307は、一般に広く市販されているものであり、これらは、アクチュエータ連結部308を間に挟んで直線的に延びるように、接着剤によってアクチュエータ連結部308に固定されている。また、積層型圧電素子306の自由端には、試料保持部211が取り付けられている。

図3Aとの類似性から理解されるように、本実施の形態の走査機構も、アクチュエータ305の中央付近あるいは重心付近が保持されているため、振動が少なく、高速走査に対しても安定に動作する。

さらに、本実施の形態の走査機構では、二本の積層型圧電素子306、307の間に挟まれたアクチュエータ連結部308が、例えばシリコンゴムからなるアクチュエータ保持部210によって保持されている。このため、本実施の形態の走査機構は、第1の実施の形態の走査機構に比べて、アクチュエータ305の取り付けの際のシリコンゴムの盛りつけ量などにばらつきに対しても、走査機構の個体差(性能差)が出にくいという利点を有している。

第3の実施の形態

本発明の第3の実施の形態について図4Aと図4Bを参照して説明する。本実施の形態の走査機構は、図4Aと図4Bに示されるように、走査機構保持台401と、これに固定されたL字形状のアクチュエータ台座402と、このアクチュエータ台座402に取り付けられた二本のアクチュエータ403、404と、これらの二本のアクチュエータ403、404によって支持されたアクチュエータ405とを有している。

アクチュエータ403、404、405は、例えば積層型圧電素子であり、それぞれ、X軸、Y軸、Z軸に沿って伸縮し得る。X走査用のアクチュエータ403とY走査用のアクチュエータ404は、それぞれ、一方の端部がアクチュエータ台座402に固定されている。Z走査用のアクチュエータ405は、一番速い走査速度が要求され、その中央付近あるいは重心付近が、X走査用のアクチュエータ403とY走査用のアクチュエータ404の他方の端部に接着により固定され、保持されている。

速い走査速度が要求されるZ走査用のアクチュエータすなわち積層型圧電素子405は、電圧の印加に応じて、X走査用のアクチュエータ403とY走査用のアクチュエータ404に固定された中央付近を基準にして、その両側の部分が、矢印で示されるように、互いに反対方向に対称的に伸縮する。このため、積層型圧電素子405の伸縮動作により発生する衝撃が抑えられる。従って、本実施の形態の走査機構は、振動が少なく、高速走査に対しても安定に動作する。

また、本実施形態の走査機構は、第 1 の実施の形態の走査機構に比べて、以下に述べる利点を有している。第 1 の実施の形態の走査機構では、X 走査用と Y 走査用のアクチュエータが微小ボールを介して Z 走査用のアクチュエータに当て付けられているため、長時間の使用の間に、与圧不足となって、X 軸と Y 軸に沿った走査が不安定になることもある。これに対して、本実施の形態の走査機構では、Z 走査用のアクチュエータ 405 は接着によって X 走査用と Y 走査用のアクチュエータ 403、404 に固定されているので、X 軸と Y 軸に沿った走査が不安定になり難い。

第 4 の実施の形態

本発明の第 4 の実施の形態について図 5 A と図 5 B を参照して説明する。本実施の形態の走査機構は、図 5 A と図 5 B に示されるように、走査機構保持台 501 と、これに固定された円筒型のアクチュエータ 502 と、このアクチュエータ 502 の自由端に支持された別の円筒型のアクチュエータ 503 とを有している。

円筒型のアクチュエータ 502 は、例えば円筒型圧電素子であり、このような円筒型圧電素子は市販されている走査型プローブ顕微鏡においてよく用いられている。円筒型圧電素子 502 は、円筒形の圧電材料の外周面に設けられた四つの分割電極 504 と、内周面に設けられた対向電極とを有しており、これらの電極間に適宜電圧を印加することにより、その自由端を X 軸と Y 軸に沿って走査し得る。

円筒型のアクチュエータ 503 もまた、例えば円筒型圧電素子であり、これは円筒型圧電素子 502 より小型であり、円筒型圧電素子 502 よりも高い共振周波数を有している。円筒型圧電素子 503 は、円筒形の圧電材料の外周面に設けられた一つの電極と、内周面に設けられた一つの電極とを有しており、両電極間に適宜電圧を印加することにより、その自由端を Z 軸に沿って走査し得る。

円筒型圧電素子 503 は、その中央付近あるいは重心付近が、円筒型圧電素子 502 の自由端に設けられた部材によって保持されている。このため、円筒型圧電素子 503 は、その電極間の電圧印加に応じて、円筒型圧電素子 502 に固定された中央付近を基準にして、その両側の部分が、矢印で示されるように、互いに反対方向に対称的に伸縮する。このため、高速の Z 軸に沿った走査を担う円筒

型圧電素子503の伸縮動作により発生する衝撃が抑えられる。従って、本実施の形態の走査機構は、振動が少なく、高速走査に対しても安定に動作する。

第5の実施の形態

本発明の第5の実施の形態について図6Aと図6Bを参照して説明する。本実施の形態の走査機構は、図6Aと図6Bに示されるように、XY走査のための平行ばねステージ構造のXYステージと、これに取り付けられたZ走査のためのアクチュエータ606を有している。平行ばねステージ構造のXYステージは、特開平11-126110号に開示されており、その内容は参照によって本明細書に組み込まれるものとする。

XYステージは、固定テーブル601と可動テーブル607を有しており、可動テーブル607のY軸に沿った両側に設けられた一対の弾性部材608、609と、可動テーブル607のX軸に沿った両側に設けられた一対の弾性部材610、611と、可動テーブル607をX軸に沿って移動させるための変位を発生する一対のX方向用アクチュエータ602、603と、可動テーブル607をY軸に沿って移動させるための変位を発生する一対のY方向用アクチュエータ604、605とを有している。

弾性部材608、609は、例えば、X軸に沿って延びるスリットを持つX軸に沿って長い矩形ばねであり、それぞれ、X軸に沿っては比較的高い剛性を有し、反対に、Y軸に沿っては比較的低い剛性を有している。弾性部材610、611は、例えば、Y軸に沿って延びるスリットを持つY軸に沿って長い矩形ばねであり、それぞれ、Y軸に沿っては比較的高い剛性を有し、反対に、X軸に沿っては比較的低い剛性を有している。

従って、弾性部材608、609は、可動テーブル607のY軸に沿った移動を大きく規制することなく、そのX軸に沿った移動を規制する。一方、弾性部材610、611は、これとは反対に、可動テーブル607のX軸に沿った移動を大きく規制することなく、そのY軸に沿った移動を規制する。

また、弾性部材608、609とX方向用アクチュエータ602、603および弾性部材610、611とY方向用アクチュエータ604、605は、互いに共働して可動テーブル607を同一平面上に維持するように支持している。つま

り、これらは、可動テーブル607のZ軸に沿った移動を規制している。言い換えれば、弾性部材608、609とX方向用アクチュエータ602、603および弾性部材610、611とY方向用アクチュエータ604、605は、可動テーブル607のZ軸に沿った移動を規制する案内機構を構成している

5 高速走査が要求されるZ走査を担うアクチュエータ606は、例えば積層型圧電素子であり、これはその中央付近が可動テーブル607に例えば接着により固定されている。Z走査用の積層型圧電素子606は、電圧の印加に応じて、可動テーブル607に固定された中央付近を基準にして、その両側の部分が、矢印で示されるように、互いに反対方向に対称的に伸縮する。このため、積層型圧電素子606の伸縮動作により発生する衝撃が抑えられる。従って、本実施の形態の走査機構は、振動が少なく、高速走査に対しても安定に動作する。

以下、本発明の走査機構の利点の理解を助けるための比較例について説明する。以下に述べる比較例はいずれも従来例に従う走査機構である。

第1の比較例

10 第1の比較例について図7Aと図7Bを参照して説明する。本比較例の走査機構は、図7Aと図7Bに示されるように、走査機構保持台701と、これに固定されたL字形状のアクチュエータ台座702と、このアクチュエータ台座702に取り付けられた二本のアクチュエータ703、704と、これらの二本のアクチュエータ703、704によって保持されたアクチュエータ705とを有して
15 いる。

20 アクチュエータ703、704、705は、例えば積層型圧電素子であり、それぞれ、X軸、Y軸、Z軸に沿って伸縮し得る。X走査用の積層型圧電素子703とY走査用の積層型圧電素子704は、それぞれ、一方の端部がアクチュエータ台座702に固定されている。Z走査用の積層型圧電素子705は、長いストロークすなわち走査範囲を得るために、一方の端部が、X走査用の積層型圧電素子703とY走査用の積層型圧電素子704の他方の端部に接着により固定されている。
25

この走査機構では、Z走査用の積層型圧電素子705の伸縮動作は、X走査用とY走査用の積層型圧電素子703、704にモーメントを発生させる。これは

振動を発生させ、発生した振動はアクチュエータ台座 702 や走査機構保持台 701 に伝わり、走査機構を揺らす。

上述した実施形態の走査機構はいずれも、この比較例の走査機構に比べて、振動ノイズが低減されている。

5 第2の比較例

第2の比較例について図8Aと図8Bを参照して説明する。本比較例の走査機構は、図8Aと図8Bに示されるように、走査機構保持台801と、これに固定されたL字形状のアクチュエータ台座802と、このアクチュエータ台座802に固定されたX走査用のアクチュエータ803と、X走査用のアクチュエータ803の自由端部に固定されたY走査用のアクチュエータ804と、Y走査用のアクチュエータ804の自由端部に固定されたZ走査用のアクチュエータ805とを有している。

アクチュエータ803、804、805は、例えば積層型圧電素子であり、これらは、長いストロークすなわち走査範囲を得るために、互いに直列に90度方向を変えて連結されている。

この走査機構では、Z走査用の積層型圧電素子805の伸縮動作は、第1の比較例と同様に、Y走査用の積層型圧電素子804やX走査用の積層型圧電素子803にモーメントを発生させる。これは振動を発生させ、発生した振動はアクチュエータ台座802や走査機構保持台801に伝わり、走査機構を揺らす。

上述した実施形態の走査機構はいずれも、この比較例の走査機構に比べて、振動ノイズが低減されている。

第3の比較例

第3の比較例について図9Aと図9Bを参照して説明する。本比較例の走査機構は、図9Aと図9Bに示されるように、走査機構保持台901と、これに固定されたL字形状のアクチュエータ台座902と、X走査用のアクチュエータ903と、Y走査用のアクチュエータ904と、Z走査用のアクチュエータ905とを有している。アクチュエータ903、904、905は、例えば積層型圧電素子であり、それぞれ、X軸、Y軸、Z軸に沿って伸縮し得る。

X走査用のアクチュエータ903とY走査用のアクチュエータ904の一方の

端部はアクチュエータ台座 902 に固定され、Z 走査用のアクチュエータ 905 の一方の端部は走査機構保持台 901 に固定されている。三本の積層型圧電素子 903、904、905 の他方の端部は互いに連結されている。つまり、本比較例の走査機構は、走査型トンネリング顕微鏡の走査機構として最も一般的な構造の一つである、いわゆるトライポッド型の走査機構である。

この走査機構では、Z 走査用の積層型圧電素子 905 の伸縮動作は、その反作用が走査機構保持台 901 に直接伝わって走査機構を揺らしたり、X 走査用と Y 走査用の積層型圧電素子 903、904 を歪ませ、その振動がアクチュエータ台座 902 に伝わって走査機構を揺らしたりする。

上述した実施形態の走査機構はいずれも、この比較例の走査機構に比べて、振動ノイズが低減されている。

第 6 の実施の形態

本発明の第 6 の実施の形態について図 10A～図 10C を参照して説明する。図 10A は本実施の形態の走査機構の斜視図であり、図 10B は、図 10A を矢印 A の方向から見た図であり、図 10C は図 10A を矢印 B の方向から見た図である。

本実施の形態の走査機構は、ベースプレートである走査機構保持台 1001 と、これに固定された第 1 のアクチュエータ保持部 1006 と、このアクチュエータ保持部 1006 に取り付けられた Y 軸に沿って伸縮可能な Y 走査用アクチュエータ 1002 と、Y 走査用アクチュエータ 1002 の他端に取り付けられたブロック 1008 と、ブロック 1008 に固定された第 2 のアクチュエータ保持部 1009 と、このアクチュエータ保持部に取り付けられた X 軸に沿って伸縮可能な X 走査用アクチュエータ 1003 と、X 走査用アクチュエータ 1003 の他端に取り付けられたアクチュエータ連結部 1011 と、アクチュエータ連結部 1011 に固定された Z 軸に沿って伸縮可能な二本のアクチュエータ 1004、1005 とを有している。

二本のアクチュエータ 1004、1005 とアクチュエータ連結部 1011 は、Z 走査用アクチュエータを構成している。Z 走査用アクチュエータを構成するアクチュエータ 1004 の自由端側 1013 には、必要に応じて、(図 2A～図 2

Dの試料保持部211と同様の)試料保持部が取り付けられる。第1のアクチュエータ保持部1006はねじ1007によって走査機構保持台1001に固定されており、第2のアクチュエータ保持部1009はねじ1010によってブロック1008に固定されている。

5 アクチュエータ1002、1003、1004、1005は、例えば積層型圧電素子であり、長さが5mmで断面が2mm×3mmであり、100Vの電圧印加に対して2.7 μ m伸び縮みする。これらのアクチュエータは、積層型圧電素子の代わりに、円筒型圧電素子が用いられてもよい。

10 図10Bや図10Cから理解されるように、ブロック1008は走査機構保持台1001から離れており、Y走査用アクチュエータ1002の駆動に従ってY軸に沿って移動し得る。また図10Bから理解されるように、アクチュエータ連結部1011は、ブロック1008とは接触しておらず、X走査用アクチュエータ1003の駆動に従ってX軸に沿って移動し得る。

15 走査周波数の速いZ軸に沿った走査すなわちZ走査に伴い発生する振動のX走査用アクチュエータ1003などへの伝達を抑えるため、Z走査用アクチュエータを構成する二本のアクチュエータ1004、1005は、アクチュエータ連結部1011を中心に互いに逆方向に同期しながら駆動される。

20 走査機構の小型化のため、Z走査用アクチュエータの下側のアクチュエータ1005は、ブロック1008に形成された貫通穴(にげ穴)1012の中に、ブロック1008に接触することなく延びている。

25 本実施の形態の走査機構は、図3Bを用いて説明した第2の実施の形態と同様、Z走査用アクチュエータを構成する二本のアクチュエータ1004、1005がZ軸に沿って互いに逆方向に対称的に伸縮するので、高速のZ走査により発生する衝撃がバランスするため、二本のアクチュエータ1004、1005を連結しているアクチュエータ連結部1011に生じる振動が少ない。従って、アクチュエータ連結部1011を保持しているX走査用アクチュエータ1003や、さらにこれを保持しているY走査用アクチュエータ1002が受ける振動が少ない。その結果、この走査機構は、高速走査に対しても安定して動作する。

 また、本実施の形態の走査機構1000は、ブロック1008の左端からX走

査用アクチュエータを右側に折り返した構造になっており、ブロック１００８の上に載る部分(例えばＸ走査用アクチュエータ１００３などを含む)の重心が、Ｙ走査用アクチュエータの中心軸(伸縮方向に平行で、アクチュエータの断面の中心を通る線)付近に位置しているので、Ｙ走査に対してヨーイングが起き難い。

5 この点も高速走査時の安定性の向上に貢献している。

第７の実施の形態

本発明の第７の実施の形態について図１１を参照して説明する。本実施の形態の走査機構は、その基本的な構成は図１０Ａ～図１０Ｃを用いて説明した第６の実施の形態の走査機構１０００と類似している。

10 本実施の形態の走査機構１１００は、ベースプレートである走査機構保持台１１０１と、これに固定された第１のアクチュエータ保持部１１０６と、このアクチュエータ保持部１１０６に取り付けられたＹ軸に沿って伸縮可能なＹ走査用アクチュエータ１１０２と、Ｙ走査用アクチュエータ１１０２の他端に取り付けられたブロック１１０８と、ブロック１１０８に固定された第２のアクチュエータ保持部１１０９と、このアクチュエータ保持部１１０９に取り付けられたＸ軸に沿って伸縮可能なＸ走査用アクチュエータ１１０３と、Ｘ走査用アクチュエータ
15 １１０３の他端に取り付けられたアクチュエータ連結部１１１１と、アクチュエータ連結部１１１１に固定されＺ軸に沿って伸縮可能な二本のアクチュエータ１１０４、１１０５とを有している。

20 二本のアクチュエータ１１０４、１１０５とアクチュエータ連結部１１１１は、Ｚ走査用アクチュエータを構成している。Ｚ走査用アクチュエータを構成するアクチュエータ１１０４の自由端側１１２１には、必要に応じて、(図２Ａ～図２Ｄの試料保持部２１１と同様の)試料保持部が取り付けられる。アクチュエータ保持部１００６はねじ１００７によって走査機構保持台１００１に固定されている。

25

ブロック１１０８は、弾性ヒンジ機構１１１７、１１１８およびブロック保持部１１１３、１１１４によって支持されている。ブロック保持部１１１３、１１１４は、ねじ１１１５、１１１６によって走査機構保持台１１０１に固定されている。弾性ヒンジ機構１１１７、１１１８は、貫通穴１１２０とそれにつながる

切り込み溝 1119 を交互に配置して形成されるバネ性を持つ機構であり、ブロック 1108 の Y 軸に沿った移動を大きく規制することなく、その X 軸と Z 軸に沿った移動を規制する。言い換えれば、弾性ヒンジ機構 1117、1118 は、ブロック 1108 の Z 軸に沿った移動を規制する案内機構を構成しており、この案内機構は、Y 走査用アクチュエータ 1102 の Z 軸に沿ったたわみの発生を抑えている。

図 10A～図 10C に示される第 6 の実施の形態の走査機構 1000 では、試料保持部が Z 走査用アクチュエータ 1004 の端部 1013 に必要に応じて取り付けられ、試料が試料保持部に取り外し可能に固定される。試料の取り替えの際、試料固定のために -Z 方向に押しつける力が試料保持部に加わる。X 走査用アクチュエータ 1003 と Y 走査用アクチュエータ 1002 はそれぞれ実質的に片持ち支持されているので、その固定端に、試料交換の際に試料保持部に加わる力のモーメントによる応力が働いた際に、折れる可能性がある。特に、Y 走査用アクチュエータ 1002 とアクチュエータ保持部 1006 との接合部が折れ易い。このため、試料の取り替え作業は慎重に行う必要がある。

これに対して図 11 に示される本実施の形態の走査機構 1100 では、Y 走査用アクチュエータ 1102 は、ブロック 1108 とアクチュエータ保持部 1107 とによって両持ち支持されている。これにより、第 6 の実施の形態の走査機構 1000 では最も折れ易かった Y 走査用アクチュエータ 1102 とアクチュエータ保持部 1106 の接合部での折れは発生し難い。両持ち支持は、また、Y 走査用アクチュエータ 1102 がその上に設けられた機構の重さにより重力方向(-Z 方向)にたわむのを防止し、たわみによる X Y Z 走査の直交性が崩れるのを防いでいる。

これらの観点からすると本実施の形態の Y 走査機構は、弾性ヒンジ機構を使った案内機構を有しているとも見える。あるいは折り畳まれたヒンジ機構を延ばして考えれば、板バネ機構を使った案内機構を有しているとも見える。また、案内機構は、アクチュエータのたわみおよび振動の低減機構を構成していると言える。

本実施の形態の走査機構は、前述の実施の形態同様、Z 走査用アクチュエータ

を構成する二本のアクチュエータ 1104、1105 が Z 軸に沿って対称的に伸縮するので、高速の Z 走査により発生する衝撃がバランスするため、走査動作に伴い発生する振動が少なく、高速走査に対しても安定して動作する。

本実施の形態では、Y 走査用アクチュエータ 1102 の可動端側に対して案内機構すなわち弾性ヒンジが設けられているが、X 走査用アクチュエータ 1103 の可動端側に対して案内機構を設けて、X 走査用アクチュエータ 1103 の重力方向へのたわみや折れを防いで振動を低減するようにしてもよい。

第 8 の実施の形態

本発明の第 8 の実施の形態について図 12A と図 12B を参照して説明する。図 12A は、本実施の形態の走査機構の斜視図であり、図 12B は、図 12A を矢印 C の方向から見た側面図である。

本実施の形態の走査機構 1200 は、ベースプレートである走査機構保持台 1201 と、これに固定された第 1 のアクチュエータ保持部 1206 と、このアクチュエータ保持部 1206 に取り付けられた Y 軸に沿って伸縮可能な Y 走査用アクチュエータ 1202 と、Y 走査用アクチュエータ 1202 の他端に取り付けられたブロック 1208 と、ブロック 1208 に固定された第 2 のアクチュエータ保持部 1209 と、このアクチュエータ保持部 1209 に取り付けられた X 軸に沿って伸縮可能な X 走査用アクチュエータ 1203 と、X 走査用アクチュエータ 1203 の他端に取り付けられたアクチュエータ連結部 1211 と、アクチュエータ連結部 1211 に固定された Z 軸に沿って伸縮可能な二本のアクチュエータ 1204、1205 とを有している。

二本のアクチュエータ 1204、1205 とアクチュエータ連結部 1211 は、Z 走査用アクチュエータを構成している。Z 走査用アクチュエータを構成するアクチュエータ 1204 の自由端側 1226 には、必要に応じて、(図 2A ～ 図 2D の試料保持部 211 と同様の)試料保持部が取り付けられる。第 1 のアクチュエータ保持部 1206 はねじ 1207 によって走査機構保持台 1201 に固定されており、第 2 のアクチュエータ保持部 1209 はねじ 1210 によってブロック 1208 に固定されている。

図 12B に示されるように、Y 走査用アクチュエータ 1202 の駆動に従って

Y軸に沿って移動されるブロック1208は、走査機構保持台1201と第1の抑え板1212との間に位置しており、微小球1216、1222、1224、1225、1215(図12A参照)によって挟み込まれている。走査機構保持台1201と抑え板1212は、互いに平行に固定されるように、ねじ1213、1214によって間隔が調整されている。これにより、ブロック1208は、Y軸に沿った動きに関しては大きな制約を受けないが、Z軸に沿った動きが制限される。

言い換えれば、本実施の形態の走査機構は、ブロック1208のZ軸に沿った動きを規制する微小球の転がりあるいは滑り案内を有しており、この案内は、ブロック1208の下に位置する走査機構保持台1201と、ブロック1208と走査機構保持台1201の間に位置する微小球1224、1225と、ブロック1208の上方に位置する抑え板1212と、ブロック1208と抑え板1212の間に位置する微小球1215、1216、1222と、抑え板1212をブロック1208と微小球1215、1216、1222、1224、1225を間に挟んで走査機構保持台1201に押し付けるためのねじ1213、1214とを有している。

X走査用アクチュエータ1203の駆動に従ってX軸に沿って移動されるアクチュエータ連結部1211は、ブロック1208と第2の抑え板1217との間に位置しており、微小球1219、1220により上から、また微小球1221により下から支えられて、Z軸に沿った動きが制限されている。ブロック1208と抑え板1217は、互いに平行に固定されるように、ねじ1218、1227によって間隔が調整されている。これにより、アクチュエータ連結部1211は、X軸に沿った動きに関しては大きな制約を受けないが、Z軸に沿った動きが規制される。

言い換えれば、本実施の形態の走査機構は、アクチュエータ連結部1211のZ軸に沿った動きを規制する微小球の転がりあるいは滑り案内を有しており、この案内は、アクチュエータ連結部1211の下に位置するブロック1208と、アクチュエータ連結部1211とブロック1208の間に位置する微小球1221と、アクチュエータ連結部1211の上方に位置する抑え板1217と、アク

チュエータ連結部 1211 と抑え板 1217 の間に位置する微小球 1219 と、抑え板 1217 をアクチュエータ連結部 1211 と微小球 1219、12121 を間に挟んでブロック 1208 に押し付けるためのねじ 1218、1227 とを有している。

5 このように本実施の形態の走査機構 1200 では、抑え板 1212 とねじ 1213、1214 と微小球 1216、1215、1222、1224、1225 を含む微小球の転がりあるいは滑り案内によって、Y 走査用アクチュエータ 1202 のたわみと振動が抑えられており、また、抑え板 1217 とねじ 1218、1227 と微小球 1219、1220 を含む微小球の転がりあるいは滑り案内によ
10 って、X 走査用アクチュエータ 1203 のたわみと振動が抑えられている。

15 米国特許 5,912,461 号には、微小球の転がりあるいは滑り案内を有している走査型プローブ顕微鏡のプローブ走査機構が開示されている。この走査機構では、走査される部材である移動体と各アクチュエータの可動端の端面との間に微小球が配置されており、アクチュエータの変位は微小球を介して間接的に移動体に伝えられる。また、移動体と各アクチュエータは、磁石やバネによって、微小球を間に挟んで互いに引き付けられている。

20 これに対して、本実施の形態の走査機構 1200 では、移動される部材(例えばブロック 1208)は、これを駆動するアクチュエータ(例えば Y 走査用アクチュエータ 1202)に直接連結されており、微小球の転がりあるいは滑り案内は、このアクチュエータの走査の動きを制約しないように、移動される部材を案内する。

25 本実施の形態の走査機構と米国特許 5,912,461 号の走査機構は共に微小球の転がりあるいは滑り案内を有しているが、この点において両者は構造的に異なっている。本実施の形態の走査機構の方が、高い機械的剛性を持ち、直接的な駆動を行なっているため、振動がより少なく、より高速の走査を行なうことができる。

 また、米国特許 5,912,461 号のプローブ走査機構では、走査される部材である移動体を保持するための機構(すなわち磁石やバネ)を走査を担う部分に内蔵させているために形状が大きくなる傾向にあり、本発明の走査機構の目指す高

速走査の用途には適していない。また、磁石を用いた構成においては、移動体が不用意に外れて落下してしまう可能性が否定できず、使用に際し慎重に扱う必要があり、使い勝手の面でやや問題がある。

これに対して、本実施の形態の走査機構では、走査される部材であるブロック 1208 とアクチュエータ連結部 1211 は共に、Z 軸に沿った両側の側面に微小球が接して配置され、外側から抑えられている。すなわち、走査される部材を保持するための機構が、走査を担う部分の外部に設けられている。従って、走査周波数の低下を招く被走査部の重量の増加や形状の大型化などを最小限に抑えることができ、高速走査の用途に適している。また、走査される部材の落下の心配もなく、安定して使用することができる。

また、上述した実施の形態では、圧電素子のアクチュエータを例にあげて説明したが、駆動部の運動系の重心付近を保持することにより振動の発想を抑えるという技術思想は他のアクチュエータにも適用できる。例えば、ボイスコイル方式のアクチュエータに対しても適用可能であり、その運動系の重心付近を保持することにより同様の利点を得ることができる。

さらに本発明の走査機構は、振動を抑えて高速動作を可能にする利点のほかに、走査ノイズ音を低減する利点も有しており、これにより不快な駆動音を低減することができる。

Additional advantages and modifications will readily occur to those skilled in the art. Therefore, the invention in its broader aspects is not limited to the specific details and representative embodiments shown and described herein. Accordingly, various modifications may be made without departing from the spirit or scope of the general inventive concept as defined by the appended claims and their equivalents.